高性能纤维织物抗爆性能试验研究

解江,姜超,高斌元,傅博宇,冯振宇

(中国民航大学安全科学与工程学院,300300 天津)

摘　要:为了探究柔性纤维织布的抗爆性能,试验研究了织布在爆炸冲击载荷下的响应与失效行为。对芳纶纤维、碳纤维、超高分子量聚乙烯纤维3种单一纤维织布进行了爆炸冲击试验,并与3种织布的混杂层叠形式进行了对比。进一步对不同厚度混杂织布的抗爆能力进行了评估。结果表明:织布在爆炸冲击载荷下主要表现为破孔、织布撕裂、纱线拉脱和烧蚀等失效模式;相同厚度下,混杂织布和芳纶织布对超压的衰减能力优于超高分子量聚乙烯纤维织布和碳纤维织布;碳纤维织布不适合单独作为抗爆材料,超高分子量聚乙烯纤维织布受温度影响较大,不适合作为迎爆面。

关键词:高性能纤维;混杂织布;爆炸冲击;动态响应;失效模式

中图分类号:O38　　　　**文献标志码:**A

Experimental study on blast resistance of high performance fabric

XIE Jiang, JIANG Chao, GAO Binyuan, FU Boyu, FENG Zhenyu

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, 300300 Tianjin, China)

Abstract: In order to study the anti-blast performance of flexible fabric, the response and failure behavior of fabric under blast impact were analyzed by tests. The blast tests of aramid fabric, carbon fabric and ultra-high molecular weight polyethylene fabric were carried out, and the results were compared with hybrid fabrics. Furthermore, the blast resistance ability of hybrid fabrics with different thickness was evaluated. The results show that the main failure modes of fabric are perforation, tear, yarn pull-off, and burn. The results show that the overpressure attenuation capacity of hybrid fabrics and aramid fabrics is better than that of UHMWPE fiber fabrics and carbon fiber fabrics when the thickness is the same. Carbon fiber fabric is not suitable to be used as anti-blast material alone and UHMWPE fabric is not suitable for front-face because of the influence of high temperature.

Keywords: high performance fiber; hybrid fabric; blast impact; dynamic response; failure mode

2008 年,美国联邦航空局颁布了 FAR25-127 号修正案,提出最小风险炸弹位置(LRBL)的适航要求[1],最大审定客座量大于 60 座或者最大审定起飞总重量超过 100 000 磅的飞机必须符合:在飞机上设计一个位置,在爆燃事件中将爆炸或有燃烧作用的装置放置于此以减小对飞机的影响。欧洲航空安全局也将最小风险炸弹位置的设计要求纳入适航规章。2008 年 FAA 咨询通告 AC25.795-6[2] 给出了满

收稿日期:2021-04-15　　　**修回日期:**2021-11-22
基金项目:航空科学基金资助项目(No.201941067001)
通信作者:冯振宇,博士,教授,研究方向为结构强度。E-mail:mhfzy@163.com
引用格式:解江,姜超,高斌元,等.高性能纤维织物抗爆性能试验研究[J].应用力学学报,2022,39(1):35-43.
XIE Jiang, JIANG Chao, GAO Binyuan, et al. Experimental study on blast resistance of high performance fabric[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1): 35-43.

足25.795条关于LRBL可接受的符合性方法:对于飞行中的飞机,当在客舱发现可疑物品时,可使用包容装置来将其影响减至最小。因此研究机载轻质抗爆容器,开展小当量、冲击波为主的简易爆炸装置的包容设计有着重要的意义。

文献[3]研发了一种由高弹性、高强度纤维组成的织物结构,并以此开发了一种适用窄体客机的轻型防爆袋。该防爆袋能承受爆炸冲击和冲击后的准静态高压,阻止高能碎片冲出,承受高温并遏制起火。随着材料科学的进步,芳纶、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)等高性能纤维材料以其比强度、比模量高,具有较好的吸能特性,且无二次杀伤效应,在防弹抗爆领域得到了发展和应用。目前的研究主要集中于纤维织布的弹道冲击[4-9]以及纤维增强树脂板的防弹抗爆领域[10-15],对于具有较高柔韧性、树脂含量低(不超过20%[16])的纤维织布,利用织布的变形或超弹变形来进行冲击波防护的研究相对较少。

文献[17]对树脂含量较低的Dyneema HB26超高分子量聚乙烯纤维平板进行爆炸试验,观察到永久变形、分层、平面内剪切、边界屈曲、局部熔化和基体损伤等不同的破坏模式。UHMWPE平板在大药量作用下也出现了穿透破裂,试验结果与等面密度的低碳钢的数值模拟结果进行了比较,Dyneema板表现出更好的抗爆效果。文献[18]采用超高分子量聚乙烯纤维增强布建造了一种柔性防爆墙,通过试验和数值模拟,研究了超高分子量聚乙烯织布墙体的爆炸响应和破坏情况。文献[19]将Kevlar织布层与客舱内饰结合进行了爆炸冲击仿真,分析发现,Kevlar织布的加入提高了机身的抗爆能力。通过研究发现,纤维织布在飞机防爆领域的应用逐步得到重视和发展。

本文将碳纤维、芳纶纤维、UHMWPE纤维织布作为研究对象,开展试验揭示3种高性能纤维织布及其混杂形式的响应及失效行为,评估了各织布的抗爆能力。

1 试验概况

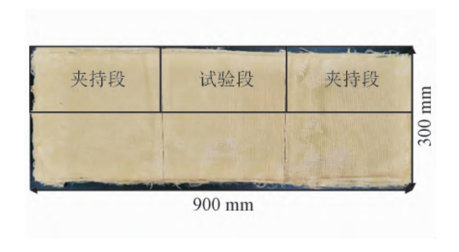
1.1 试验件

研究选用的织物为国产高性能芳纶纤维织布F-268、碳纤维织布HF30S-12K和UHMWPE纤维织布ZTZ-24,各织布参数如表1所示。裁剪制备了3种材料的单一织布及层叠织布,层叠顺序为F-268布、HF30S-12K布、ZTZ-24布。分别以A(Aramid)、C(Carbon)、U(UHMWPE)代表3种织布。制备3 mm、6 mm、9 mm、12 mm共4个混杂厚度。试验件的尺寸为900 mm×300 mm,试验有效尺寸为300 mm×300 mm。试验件如图1所示。

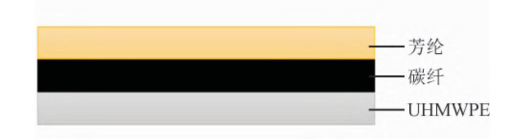
表1 各织布的主要物理参数

Tab. 1 Parameters of fabrics

项目	芳纶纤维织布	碳纤维织布	UHMWPE织布
牌号	F-268	HF30S-12K	ZTZ 24
厂家	中蓝晨光	江苏恒神	湖南中泰
纱线线密度/(tex)	166	800	126±10
纱线体密度/(g·cm^{-3})	1.44	1.8	0.97
纱线断裂伸长率/%	≥3.2	1.7~2.2	3~3.5
纱线拉伸模量/GPa	≥125	245~270	105~110
织布厚度/mm	0.3	0.6	0.6
织布面密度/(g·mm^{-2})	210~220	480	235~245



(a)织布尺寸



(b)织布层叠顺序示意图

图1 织布试验件

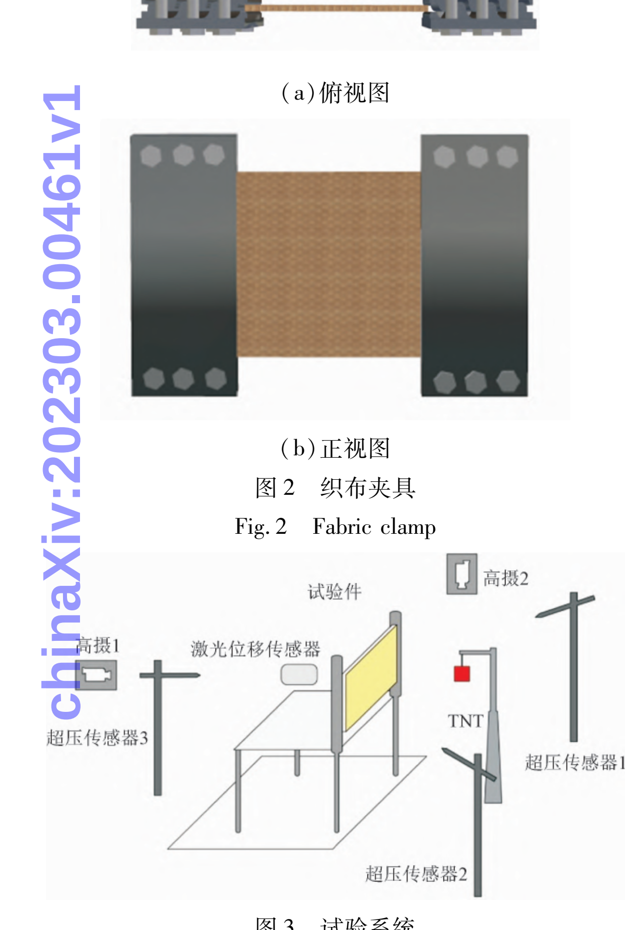
Fig. 1 Fabric specimen

设计图2所示的夹具,左右两侧夹具由两块内侧加工有波纹状的钢板构成,通过6个M20的高强螺栓进行夹紧。夹具内侧的波纹主要是为了增大织布与夹具间的摩擦力,防止在高速冲击波作用下织布滑出夹具。同时夹具在织布有效区外侧加工有倒角,防止夹具将织布剪断。

1.2 试验系统

图3为试验系统示意图。为避免地面反射对试验结果的影响,夹具与地面垂直放置。炸药悬挂于

织布前方,调节上方可伸缩支架位置控制爆距。采用 3 个量程为 0 ~ 1 725 kPa 的超压传感器记录织布迎爆面和背爆面超压,用 S1、S2、S3 表示。为防止雷管碎片破坏传感器,根据药量调节传感器与织布距离。10 g、20 g 药量下 S1、S2 距离织布 400 mm,其余药量下距离织布 500 mm,S3 距离织布 470 mm。采用两个 Phtron SA5 高速摄像机分别记录正后方织布动态响应过程和侧前方爆炸过程,帧数设置为 10 000 帧/秒。采用量程为 ± 125 mm 的激光位移传感器测量织布背爆面中心点的位移。



(a)俯视图

(b)正视图

图 2 织布夹具

Fig. 2 Fabric clamp

图 3 试验系统

Fig. 3 Test system

1.3 试验矩阵

试验使用柱形装药 TNT,压药密度为 1.6 g/cm³。设计 10 g ~ 120 g 共 5 个当量,各当量的装药尺寸见表 2。首先对 6 mm 的 3 种单一纤维织布在 60 g 药量、100 mm 爆距下进行试验研究,与相同工况下 6 mm混杂织布的响应及失效行为进行对比。并进一步探究不同厚度混杂织布在不同强度爆炸载荷下的抗爆性能。试验设计了 4 种混杂织布厚度、5 种炸药当量、4 种爆距,共计 10 组试验。以 H3-1 为例说明层叠织布的命名规则:H 表示混杂铺层;3 表示织布厚度;-1 试验件编号。试验矩阵见表 3。

表 2 炸药尺寸

Tab. 2 Charge size

当量/g	直径/mm	长度/mm	长径比
10	20	20	1∶1
20	25	25	1∶1
60	35	39	1∶1.1
100	40	50	1∶1.25
120	40	60	1.5

表 3 爆炸试验矩阵

Tab. 3 Test matrix

试验编号	织布厚度/mm	爆距/mm	药量/g
A6-1	6	100	60
U6-1	6	100	60
C6-1	6	100	60
H3-1	3	300	10
H3-2	3	300	20
H3-3	3	200	60
H3-4	3	150	20
H3-5	3	100	60
H6-1	6	100	60
H9-1	9	100	100
H9-2	9	100	60
H12-1	12	100	100
H12-2	12	100	120

2 织布对爆炸超压的衰减作用

2.1 爆炸超压

大量试验表明,炸药在空气中爆炸存在相似律,爆炸冲击波的超压峰值与比例距离存在一定关系。

定义比例距离为[20]

$$Z = R/(W^{1/3}) \qquad (1)$$

式中:Z 为比例距离;R 为爆距(单位为 m);W 为药量(单位为 kg)。

文献[21]中经过对不同经验公式的对比,提出新的计算超压 ΔP(单位为 MPa)的经验公式为

$$\Delta P=\frac{0.084}{Z}+\frac{0.27}{Z^2}+\frac{0.7}{Z^3} \tag{2}$$

根据试验工况，获得不同比例距离下的超压数据，与超压公式(2)计算得到的超压进行对比。表4为相应比例距离下的超压峰值。试验与经验公式计算得到的超压峰值对比如图4所示。

表4　不同比例距离下的超压峰值

Tab. 4　Overpressure peak values at different scaled distances

试验编号	药量/g	Z/($m\cdot kg^{-1/3}$)	迎爆面超压峰值/kPa	经验公式计算值/kPa
H3-1	10	1.85	175.3	234.5
H3-2	20	1.47	411.5	402.5
H6-1	60	1.28	585.1	564.2
H9-1	100	1.08	856.5	864.9
H12-1	120	1.00	878.3	1 054.0

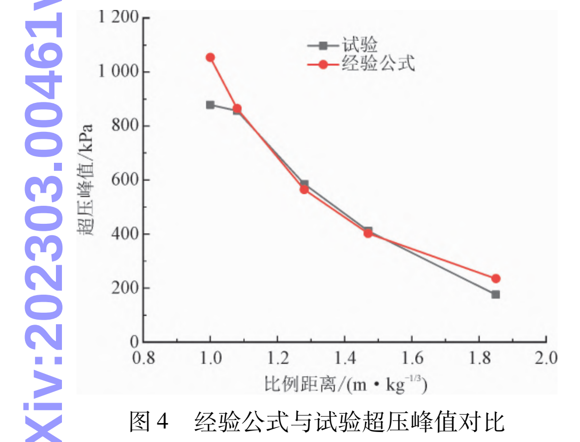


图4　经验公式与试验超压峰值对比

Fig. 4　Comparison of empirical formula and test overpressure

由图4可以看出：试验获得的超压峰值与经验公式的计算值误差较小；二者趋势相同，随着比例距离增大，超压峰值逐渐减小，说明试验获得的超压数据具有有效性；比例距离等于1时，出现了相对较大的误差。分析出现偏差的原因是经验公式的拟合过程是一个偏理想化的爆炸相似律的模拟，尤其在比例距离较小时，爆炸相似律经验公式结果对比试验结果会出现不理想的拟合效果。

2.2　不同种类织布的超压衰减

统计得到各织布超压峰值，如表5所示。混杂铺层、芳纶、UHMWPE、碳纤维织布背爆面峰值分别为71.5 kPa、72.4 kPa、100.7 kPa、106.7 kPa，迎爆面超压分别为585.0 kPa、559.5 kPa、555.7 kPa、556.1 kPa，4种织布对超压衰减的百分比分别为87.8%、87.1%、81.9%、80.8%。图5为不同材料织布对超压的衰减程度的对比。由图5可得，混杂层叠织布和芳纶织布对爆炸超压的衰减优于碳纤和UHMWPE织布。

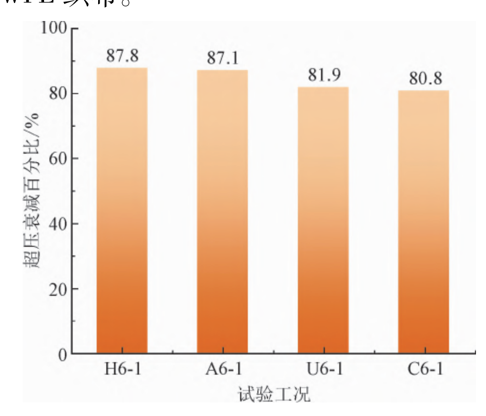


图5　不同种类织布的超压衰减百分比

Fig. 5　Overpressure attenuation of different kinds of fabrics

分析超压衰减能力差异原因：混杂织布和芳纶织布在药量60 g、爆距100 mm工况下未出现穿透现象，碳纤维织布被击穿，冲击波透过破孔向后传播。UHMWPE织布出现轻微穿透现象，并且织布自由边出现较大程度收缩，织布上下大幅移动使冲击波有空间向后方传播。

表5　不同织布的超压峰值

Tab. 5　Overpressure of different fabrics

因素	试验编号	织布厚度/mm	爆距/mm	药量/g	迎爆面超压峰值/kPa	背爆面超压峰值/kPa	超压衰减百分比/%
织布种类	H6-1	6	100	60	585.0	71.5	87.8
	A6-1	6	100	60	559.5	72.4	87.1
	U6-1	6	100	60	555.7	100.7	81.9
	C6-1	6	100	60	556.1	106.7	80.8
厚度	H3-5	3	100	60	584.3	94.8	83.8
	H6-1	6	100	60	585.0	71.5	87.8
	H9-2	9	100	60	552.2	59.6	89.2

2.3 不同厚度织布的超压衰减

比较相同比例距离下不同厚度织布对超压的衰减作用。试验获得 3 mm、6 mm、9 mm 混杂织布在 60 g药量、100 mm 爆距下织布前后的超压峰值，并计算得到对超压的衰减百分比。由图 6 可知，随着织布厚度的增加，织布对超压衰减作用逐渐增强。分析原因为 3 mm 织布在该工况下被击穿，冲击波透过破孔向织布后方传播，织布背爆面测得的超压较大。6 mm和 9 mm 织布都未出现穿孔，9 mm 织布变形更小，对织布后方空气扰动也相对较弱，超压衰减作用较 6 mm 织布更强。

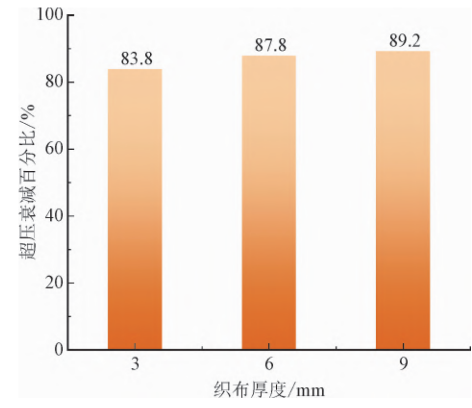


图 6　不同厚度织布的超压衰减百分比

Fig. 6　Overpressure attenuation of fabrics with different thickness

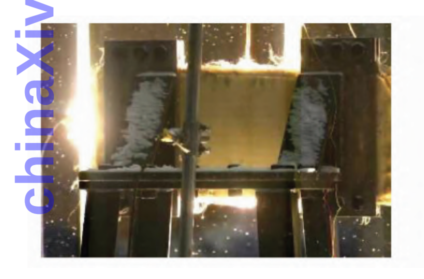
3　爆炸载荷下织布的动态响应

3.1　单一纤维织布的动态响应

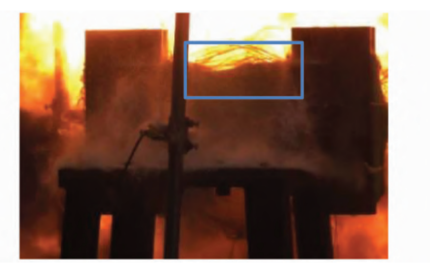
如图 7 所示，芳纶织布在冲击波作用下中心区域迅速向后位移，自由边变形收缩，中心区域的经向纱线从织布中拉脱滑出，随后在负压和织布弹性的作用下回弹，如此振荡至停止运动。从自由边纱线可以看出，织布受力从中心区域向夹持边界的两边递减。织布最后呈向前鼓凸状态。

如图 8 所示，碳纤维织布没有发生前后振动变形，织布中心被迅速炸成碎末，碎末呈“云团”状向后喷出，纤维主要呈脆性断裂，断裂的纤维呈絮状，织布破孔呈花瓣状向迎爆面方向散开，抗损伤能力较差。

如图 9 所示，爆炸初期 UHMWPE 织布中心破孔处有黑烟冒出，自由边向内产生很大收缩，但没有出现与芳纶织布类似的经向纱线拉脱滑出现象。织布不仅沿冲击方向前后振动，同时在织布平面内产生了较大幅度的上下晃动。



（a）爆炸火光



（b）纱线拉脱



（c）鼓凸变形

图 7　芳纶织布的动态响应

Fig. 7　Dynamic response of aramid fabric



（a）破孔



（b）碎末云团



（c）失效状态

图 8　碳纤维织布的动态响应

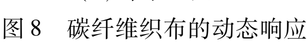


Fig. 8　Dynamic response of carbon fabric



(a)破孔处黑烟



(b)自由边收缩



(c)织布上下移动

图 9　UHMWPE 织布的动态响应

Fig. 9　Dynamic response of UHMWPE fabric

3.2　混杂织布的动态响应

图 10 为典型未破坏工况的爆炸历程。由图 10 可知,在爆炸瞬间,织布后侧观察到火光,随后爆炸产物将织布包围。织布在高速冲击波作用下,迅速向后产生位移,由于两端夹持,自由两边向内收缩。织布向后到达最大位移后,在负压和织布拉伸作用下,自由边被拉伸回到水平位置,织布在冲击方向产生来回振荡。爆炸后期,织布纱线出现了燃烧现象,最终呈向前鼓凸状态。

图 11 为典型织布被击穿的爆炸历程。在爆炸初期,背爆面多个位置观察到火光,然后织布中心位置产生较大破孔,随着冲击波穿过织布,纱线断裂为絮状并呈花瓣状向四周散开,同时可以观察到大量纱线碎屑向后飞出,最终织布完全破裂。



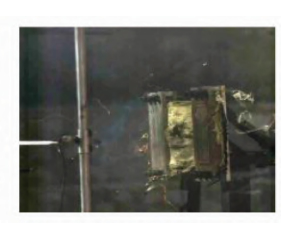
(a)0.1 ms



(b)2.7 ms



(c)34.5 ms



(d)117 ms

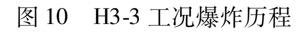


图 10　H3-3 工况爆炸历程

Fig. 10　Blast process of H3-3 condition



(a)0.1 ms



(b)0.6 ms



(c)1.7 ms



(d)失效状态

图 11　H3-5 工况爆炸历程

Fig. 11　Blast process of H3-5 condition

试验过程中利用激光位移传感器记录了混杂层叠织布未完全破孔时织布的变形过程,测量点为背爆面织布中心。爆炸前织布的平衡位置记为 0 位移点,激光传感器设置为织布向传感器方向运动位移为负、向炸药方向运动位移为正。对传感器获得的位移曲线采用 Savitzky-Golay 方法进行滤波平滑,该方法不仅能够在除噪的过程中保证原始数据不失真,还能保留数据的相对极大值和极小值等分布特性[22],得到 3 mm 混杂层叠织布在不同药量和爆距下的位移变化过程,如图 12 所示。

由图 12 可以看出,在爆炸冲击波载荷下,短时间内纤维织布向后方运动,随后在织布自身的弹性作用和负压作用下反向运动达到正向位移峰值,如此往复直到停止运动。比例距离为 1.4 时,织布最早出现位移峰值,且呈现多个峰值,最终停留在 −9.4 mm处,接近初始位置;比例距离为 0.55 和

0.51 时，织布在正向和负向各出现一个峰值位移，且两种工况下出现位移峰值的时间基本相同，比 1.4 时晚，但峰值位移较大，最终分别停留在 −23.2 mm和 19.8 mm 处。比例距离越小，织布的峰值位移越大。原因为：比例距离大时，作用于织布的冲击波冲量较小，织布产生小幅度的振动；而比例距离较小时，较大的冲击波冲量使织布产生大的变形，织布到达峰值位移的时间推迟，最终存在较大的变形，中心点偏离初始位置的程度更大。

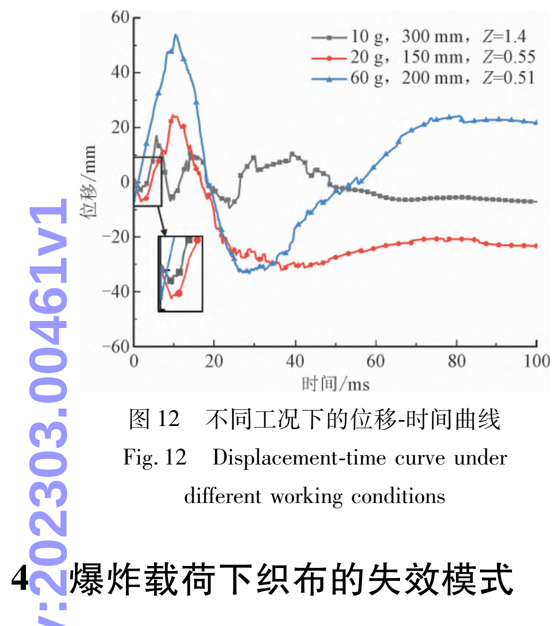


图 12　不同工况下的位移-时间曲线

Fig. 12　Displacement-time curve under different working conditions

4　爆炸载荷下织布的失效模式

4.1　单一纤维织布的失效模式

图 13 ~ 图 16 分别为 60 g 药量、100 mm 爆距下 3 种 6 mm 单一纤维织布和混杂织布的失效模式。从织布的整体失效情况看，3 种单一材料织布和混杂织布都出现了不同程度的破孔。其中芳纶织布只在第一层出现破孔，大致呈花瓣状向四周张开，背爆面织布的中心区域在拉伸力作用下，出现纱线松散现象，个别纱线断裂，夹持边界出现轻微撕裂；UHMWPE 织布各层织布都出现了不同程度的破孔，并且背爆面织布夹持边界处出现了较大程度的撕裂现象；碳纤维织布中心出现了较大尺寸的击穿现象，纱线断裂，纤维呈现细小的碎末状；对于混杂铺层织布也只是在芳纶织布的首层发生了破孔失效，破孔区域大致呈长方形，背爆面只发生鼓凸变形，未见明显损伤。

测量得到芳纶纤维织布、UHMWPE 纤维织布、碳纤维织布以及混杂织布破孔长度分别为 15 cm、19.6 cm、14.5 cm、14.3 cm。因为芳纶织布与混杂织布都只在第一层出现破孔，而 UHMWPE 织布和碳纤维织布所有层都出现不同程度破孔，因此相同厚度芳纶织布和混杂织布的抗损伤能力要比 UHMWPE 织布、碳纤维织布好；混杂织布破孔宽度最小，且背爆面未出现明显损伤，因此混杂织布抗损伤能力较芳纶织布更优。

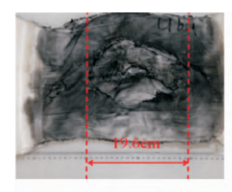




(a)迎爆面　　(b)背爆面

图 13　芳纶纤维织布失效形貌

Fig. 13　Failure morphology of aramid fabrics

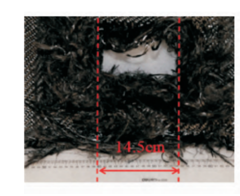


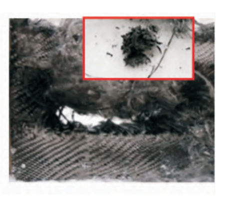


(a)迎爆面　　(b)背爆面

图 14　UHMWPE 纤维织布失效形貌

Fig. 14 Failure morphology of UHMWPE fabrics

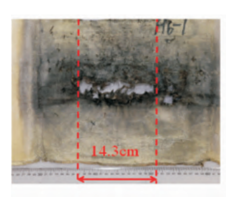




(a)迎爆面　　(b)背爆面

图 15　碳纤维织布失效形貌

Fig. 15　Failure morphology of carbon fabrics





(a)迎爆面　　(b)背爆面

图 16　混杂铺层织布失效形貌

Fig. 16　Failure morphology of hybird fabrics

对于 UHMWPE 织布，爆炸产生的高温对织布性能产生了较大影响。从织布失效情况可以看出，织布表面因高温变黑，破孔边缘出现纱线烧蚀现象。因为织布的破孔，导致前侧多层织布的抗变形能力变差，背爆面的织布承受了更大的冲击载荷，因而夹持边缘处出现了较大程度的撕裂现象。

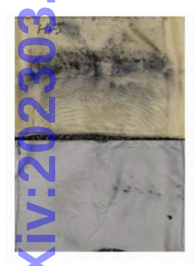
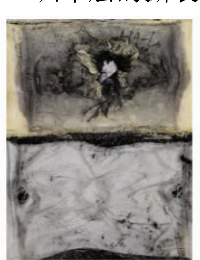
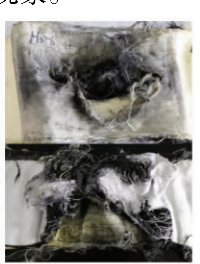
4.2 混杂织布的失效模式

在所研究工况下，混杂铺层织布主要出现 3 种不同的失效行为：①部分织布层破孔；②完全穿孔；③织布拉伸撕裂。图 17 为爆炸后典型的织布变形失效状态。

未破孔模式：织布的迎爆面爆炸后主要表现为部分纱线断裂、织布变形，并可以观察到雷管爆炸产生的碎片在织布表面造成的点坑。背爆面主要表现为 UHMWPE 织布的拉伸变形。

部分层破孔模式：在芳纶和碳纤维织布层破孔、UHMWPE 层未穿孔的工况下，断裂的纤维向四周张开，破孔呈花瓣状并向前鼓凸。同时在迎爆面的夹持边界处可以观察到经向纤维的拉伸变形现象，背爆面主要表现为织布的褶皱变形，以及夹持边界处织布的撕裂现象。

击穿模式：在完全击穿工况下，织布的整体状态表现为芳纶纤维层的破孔、碳纤层的破孔和撕裂、以及 UHMWPE 织布层的撕裂现象。

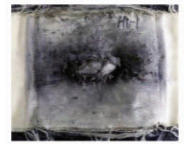




（a）未破孔　（b）部分层破孔　（c）完全破孔

图 17　混杂织布的典型失效模式

Fig. 17　Typical failure mode of hybrid fabric

图 18 为 6 mm、9 mm、12 mm 织布分别在 60 g、100 g、120 g 药量下的变形失效情况。由图 18 可知：在 100 mm 自由场爆距下，6 mm 织布只在第一层破孔和撕裂，同时自由边出现了纱线拉脱现象；9 mm织布的芳纶层和碳纤层出现破孔，UHMWPE 层保持完整；12 mm 织布在 120 g 药量下只有部分芳纶层出现破孔损伤。由试验结果可知：6 mm 厚织布可以承受 60 g 药量；9 mm 厚织布可以承受 100 g药量，12 mm 厚织布可以承受 120 g 药量。





（a）H6-1 工况　（b）H9-1 工况　（c）H12-2 工况

图 18　不同厚度织布的抗爆能力

Fig. 18　Blast resistance of fabrics with different thickness

5　结　论

1）60 g 药量、100 mm 爆距下，4 种 6 mm 织布对超压衰减的百分比分别为 87.8%、87.1%、81.9%、80.8%，混杂铺层织布和芳纶织布对爆炸超压的衰减能力优于碳纤维和 UHMWPE 织布。3 mm、6 mm、9 mm 混杂织布对超压衰减的百分比分别为 83.8%、87.8%、89.2%，随着织布厚度的增加，织布对超压衰减作用逐渐增强。

2）未穿孔工况下，响应过程多体现为织布在冲击方向的振荡，对于穿孔工况，多体现为自由边大位移量的收缩，背爆面纱线拉伸变形，完全穿孔工况还伴有织布碎屑的喷出。

3）在所研究工况内，混杂织布主要出现 3 种不同的失效行为：部分织布层破孔；完全破孔；织布拉伸撕裂。迎爆面的芳纶织布出现自由边经向纱线拉脱、中心破孔、边界撕裂和破孔边界烧蚀 4 种失效模式；中间层碳纤维织布主要出现中心破孔、纤维断裂为碎屑、织布撕裂 3 种失效模式；背爆面 UHMWPE 织布主要的失效模式为夹持边界撕裂和纤维拉脱断裂以及中心撕裂。

4）由单一材料织布的损伤情况可得，碳纤维织布不适合单独作为抗爆材料，UHMWPE 织布受温度影响较大，不适合作为迎爆面。相同厚度芳纶织布和混杂织布的抗损伤能力要比 UHMWPE 织布、碳纤维织布好；混杂织布破孔宽度最小，且背爆面未出现明显损伤，因此在相同厚度下，混杂织布抗损伤能力较芳纶织布更优。

5）对于混杂织布，100 mm 爆距下，6 mm 厚织布可以承受 60 g 药量、9 mm 厚织布可以承受 100 g 药量、12 mm 厚织布可以承受 120 g 药量。

参考文献

[1] FAR. Amendment(part 25)：Security considerations requirements for transport category airplanes：FAR 25-127[S]. Washington：Federal Aviation Administration，2008.

[2] FAA. Least risk bomb location：AC 25.795-6[S]. Washington：Federal Aviation Administration，2008.

[3] DONATO Z，SAMUELE A，ALESSANDRO B，et al. Textile-based luggage containers for onboard blast protection[J]. SAE international journal of aerospace，2011，4(2)：690-698.

[4] IGNATOVA A V，KUDRYAVTSEV O A，ZHIKHAREV M V. Influence of surface polymer coating on ballistic impact response of multi-layered fabric composites：Experimental and numerical

study[J]. International journal of impact engineering, 2020, 144: 103654.

[5] YANG Y, CHEN X. Influence of fabric architecture on energy absorption efficiency of soft armour panel under ballistic impact[J]. Composite structures, 2019, 224(9): 111015.

[6] ABTEW M A, BOUSSU F, BRUNIAUX P, et al. Engineering of 3D warp interlock p-aramid fabric structure and its energy absorption capabilities against ballistic impact for body armour applications[J]. Composite structures, 2019, 225(10): 11-15.

[7] 冯振宇,裴惠,迟琪琳,等. Kevlar织物软壁包容环抗冲击数值仿真分析研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10): 15-23. (FENG Zhenyu, PEI Hui, CHI Qilin, et al. Investigation on the high speed impact numerical simulation of Kevlar fabrics soft-wall containment[J]. Vibration and shock, 2020, 39 (10): 15-23 (in Chinese)).

[8] 周庆,何业茂,刘婷. 层间混杂复合材料装甲板防弹性能及其防弹机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(4): 837-847. (ZHOU Qing, HE Yemao, LIU Ting. Bulletproof performance and bulletproff mechanism of interlaminar hybrid composite armor plate[J]. Acta materiae compositae sinaica, 2019, 36(4): 837-847(in Chinese)).

[9] 翁浦莹,李艳清,HAFEEZULLAH M,等. Kevlar、UHMWPE叠层织物防弹性能研究[J]. 现代纺织技术, 2016, 24(3): 13-18. (WENG Puying, LI Yanqing, HAFEEZULLAH M, et al. Bulletproof performance of Kevlar and UHMWPE multi-layered textiles[J]. Advanced textile technology, 2016, 24(3): 13-18(in Chinese)).

[10] GARGANO A, PINGKARAWAT K, BLACKLOCK M, et al. Comparative assessment of the explosive blast performance of carbon and glass fibre-polymer composites used in naval ship structures[J]. Composite structures, 2017, 171(7): 306-316.

[11] DOLCE F, MEO M, FRENCH M, et al. Hybrid S2/carbon epoxy composite armours under blast loads[J]. Applied composite materials, 2012, 19(3/4): 349-362.

[12] GARGANO A, PINGKARAWAT K, PICKERD V L, et al. Effect of fibre-matrix interfacial strength on the explosive blast resistance of carbon fibre laminates[J]. Composites science & technology, 2016, 138(18): 68-79.

[13] HUANG K, RAMMOHAN A V, KUREEMUN U, et al. Shock wave impact behavior of flax fiber reinforced polymer composites[J]. Composites part B engineering, 2016, 102: 78-85.

[14] XIN L, YAHYA M Y, NIA A B, et al. Dynamic failure of basalt/epoxy laminates under blast-Experimental observation[J]. International journal of impact engineering, 2016, 102: 16-26.

[15] HAGHI R, BEHJAT B, YAZDANI M. Numerical investigation of composite structures under blast loading[J]. Journal of materials and environmental science, 2017, 8(6): 2231-2237.

[16] GRUJICIC M, ARAKERE G, HE T. A ballistic material model for cross-plied unidirectional ultra-high molecular-weight polyethylene fiber-reinforced armor-grade composites [J]. Materials science & engineering A, 2008, 498(1/2): 231-241.

[17] FALLAH A S, MICALLEF K, LANGDON G S. Dynamic response of Dyneema HB26 plates to localised blast loading[J]. International journal of impact engineering, 2014, 73: 91-100.

[18] BEI Z, NIAN X, JIN F, et al. Failure analyses of flexible ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber reinforced anti-blast wall under explosion[J]. Composite structures, 2018, 184(1): 759-774.

[19] FILIPPO M, MARIA M P, PAOLO V. Blast actions in aircrafts: an integrated methodology for designing protection devices[J]. Engineering structures, 2018, 175: 895-911.

[20] BAKER W E. Explosions in air[M]. Austin, Texas: University of Texas Press, 1973.

[21] 叶晓华. 军事爆破工程[M]. 北京:解放军出版社, 1999.

[22] 张明东,曹颖,吴博洋,等. 基于Savitzky-Golay算法的地磁去扰研究[J]. 微波学报, 2018, 34(增刊2): 166-168. (ZHANG Mingdong, CAO Ying, WU Boyang, et al. Research on geomagnetic de-interference based on Savitzky-Golay algorithm[J]. Journal of microwaves, 2018, 34(S2): 166-168(in Chinese)).

(编辑　张璐)